

УДК 621.396.6

**В. И. МЕЩЕРЯКОВ**, докт.техн.наук, проф, зав. каф., Одесский  
государственный экологический университет

**В. П. ЗАЙКОВ**, канд.техн.наук, с.н.с, нач. сектора ГП  
«НИИ «Шторм», Одесса

**А.А.ГНАТОВСКАЯ**, ст.преп., Одесский государственный экологический  
университет

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

Проведен анализ надежности работы системы с теплонагруженными сенсорными элементами и предложен путь ускорения восстановления рабочего состояния системы.

Ключевые слова: надежность, система, проектирование.

Наведено аналіз надійності роботи системи з теплонавантаженими сенсорними елементами і запропоновано шлях прискорення встановлення робочого стану системи.

Ключові слова: надійність, система, проектування.

There is an analysis of the system's working reliability with heat-loaded sensory elements and the way of acceleration of establishment of working state of a system is proposed.

Key words: reliability, system, designing.

При проектировании информационных систем, сенсорные элементы которых работают в области тепловых нагрузок, сопоставимых с физическими возможностями материалов элементов, задача обеспечения заданного уровня надежности становится особенно актуальной. Задача относится к фундаментальной проблеме построения надежной системы состоящей из ненадежных элементов.

Актуальность задачи обусловлена необходимостью повышения эффективности системы, под которой понимается отношение времени работоспособности системы к суммарному времени работоспособности и восстановления после выхода ее из строя, что возможно только путем снижения временных затрат на восстановление. Целью работы является создание условий снижения затрат времени на восстановление системы уже на стадии проектирования.

Предположим, что система обработки вторичной информации находится в существенно лучших условиях, чем первичные теплонагруженные элементы. Это условие обычно выполняется, т.к. взаимодействию с внешней высокоэнергетической нагрузкой подвержены обычно только сенсорные элементы совместно с системой обеспечения тепловых режимов.

Представим информационную систему с независимыми охлаждаемыми приемниками матричного типа, работающую в двух основных режимах: длительном *дежурном*, когда тепловые нагрузки незначительны и надежность

системы в основном определяется параметрической надежностью составляющих элементов; и кратковременном теплонагруженном *рабочем*, когда вероятность выхода их из строя теплонагруженных элементов высока. Такой эксплуатационный режим является типовым, например, для информационной системы следящего и управляющего типа, предназначенной для восприятия интенсивного инфракрасного излучения и формирования ответной реакции по результатам обработки принятого сигнала.

Длительный дежурный режим в нормальных условиях эксплуатации предполагает основной акцент проектирования на параметрической модели надежности составляющих элементов, которая усилена структурной моделью резервирования [1]. В данной модели для дежурного режима приемлемой является структура обслуживаемой системы с заменой вышедших из строя элементов, а основным критическим моментом становится скорость обнаружения и смены отказавшего узла, поскольку переход в рабочий режим системы из дежурного случаен, и система должна быть к нему постоянно готова.

Рассмотрим исходные условия дежурного режима с точки зрения надежности:

1. система в начальный момент времени находится в работоспособном состоянии и все элементы исправны;
2. параметрическое проектирование уровня надежности системы выполнено таким образом, что выход из строя элементов маловероятен;
3. обеспечена возможность перевода системы в критический температурный режим работы, замены вышедших из строя элементов из существующего резерва и последующего тестирования системы, т.е. система является обслуживаемой.

Под ремонтпригодностью понимается свойство системы, предусматривающее возможность выявления и устранения причин выхода ее из строя, обнаружение отказавших элементов, восстановление работоспособного состояния путем проведения ремонтных работ и регламентного обслуживания. Это свойство полностью определяется на стадиях: проектирования, конструирования, условиями эксплуатации системы, временными параметрами и стоимостью ремонтных работ.

Очевидно, что в дежурном режиме критичным (в это время система является неработоспособной и не выполняет свои задачи) является время поиска неисправности и замены вышедших из строя элементов. Резервирование позволяет функционировать зарезервированным элементам при выходе из строя одного из каналов, что, соответственно, повышает временной отрезок работоспособности системы и сокращает промежуток времени между ремонтами.

Для рабочего режима исходные условия будут несколько иными:

1. параметрическое проектирование не обеспечивает достаточной надежности критичных теплонагруженных элементов, и вероятность выхода их из строя составляет значимую величину;
2. рабочий режим кратковременен и нет возможности в это время проводить регламентные работы, т.е. систему можно рассматривать как необслуживаемую.

В рабочем режиме резко возрастает тепловая нагрузка на теплонагруженные элементы, что можно учесть введением коэффициента нагрузки  $k_n$ , под которым

будем понимать отношение рабочего значения нагрузки к ее номинальному значению. Значения номинальной нагрузки приведены в справочной литературе [2], для которых интенсивность отказов  $\lambda = \lambda_0$  и  $K_H = 1$ . Качественный анализ показывает, что с ростом коэффициента тепловой нагрузки увеличивается интенсивность отказов.

При многократном последовательном воздействии интенсивного входного потока излучения на теплонагруженные элементы тепловой поток не может быть снят системой охлаждения за время этого воздействия в силу кратковременности прохождения тепловой волны, поэтому тепловая нагрузка на элементы растет и процесс становится нестационарным. Это можно учесть аддитивной моделью  $\lambda = \lambda_{\text{деж}} + \lambda_{\text{раб}}$ , при этом  $\lambda_{\text{деж}} \ll \lambda_{\text{раб}}$ , где  $\lambda_{\text{деж}}$  – интенсивность отказов в дежурном режиме,  $\lambda_{\text{раб}}$  – интенсивность отказов в рабочем режиме.

Функционирование системы может быть разбито на два последовательных повторяющихся состояния: работоспособное, когда она выполняет прямые или вспомогательные задачи; и неработоспособное, наступающее непосредственно вслед за выходом ее из строя, включающее обнаружение неисправности, восстановление и тестирование системы, т.е. приведение ее в работоспособное состояние (рис. 1).

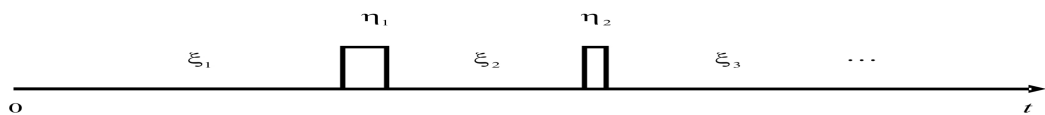


Рис. 1. Процесс функционирования теплонагруженного элемента в дежурном режиме

Работоспособность системы во времени представим моделью, которая предполагает, что система может находиться либо в состоянии работоспособности  $Z$ , либо отказа  $\bar{Z}$ . Временная последовательность функционирования системы в таком случае описывается случайной последовательностью событий  $x_1, h_1, x_2, h_2, \dots, x_n, h_n$ , где  $x_i$  – длительность  $i$ -го периода работоспособности,  $h_i$  – периода отказа, а состояние системы может быть представлено в виде

$$Z(t) = \begin{cases} Z, & \text{при } t \in \xi_i; \\ \bar{Z}, & \text{при } t \in \eta_i. \end{cases} \quad (1)$$

Из приведенных требований вытекает, что при проектировании системы необходима модель обнаружения и замены вышедших из строя элементов, определяющая затраты времени на поиск и устранение неисправностей, позволяющая контролировать и сокращать время восстановления работоспособности системы. Вторым важным моментом является факт относительности отнесения системы к обслуживаемой или необслуживаемой. Длительный период эксплуатации системы в дежурном режиме делает обслуживание обязательным условием, поскольку не существует компонентов, которые бы безотказно работали в течение нескольких лет. Рабочий режим (ради которого и создается система) настолько кратковременен (секунды либо минуты), что в течение этого периода говорить об обслуживании системы не приходится.

Для этого режима необходимы иные методы повышения жизнеспособности системы.

Момент появления отказа, как и момент восстановления работоспособности системы, являются случайными событиями. Примем гипотезу, что интервал времени от отказа до восстановления работоспособности может быть сокращен за счет корректного проектирования системы. Данный интервал времени нуждается в более детальном анализе, поскольку в этот промежуток времени система не выполняет целевой функции, что может иметь серьезные последствия.

Если обозначить функцию распределения этой случайной величины через  $q$ , то ее интегральная функция или вероятность того, что время восстановления работоспособности системы не превышает заданного, может быть представлена в виде [3]:

$$P_B(t) = P\{\theta < t\}, \quad \theta \leq t \quad (2)$$

Вероятность того, что система за указанное время  $q > t$  восстанавливает работоспособное состояние, представляется как:

$$Q_B(t) = P\{t \leq \theta\} = 1 - P_B(t) \quad (3)$$

Отсюда можно определить плотность вероятности времени восстановления работоспособности

$$f_B(t) = \frac{dP_B(t)}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

и среднее время восстановления

$$T_B = \int_0^{\infty} Q_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - P_B(t)] dt \quad (5)$$

Поскольку вероятность восстановления работоспособности является некой усредненной величиной, представляет интерес также и условная вероятность  $P_B(t/t)$  того, что восстановление произойдет на интервале времени, следующим за интервалом  $t$  после отказа, если еще не удалось восстановить систему после потери работоспособности.

$$P_B(t/t) = \frac{P_B(t+t) - P_B(t)}{1 - P_B(t)} \quad (6)$$

При  $t \rightarrow 0$  получаем дифференциальную плотность вероятности

$$m(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{P_B(t/t)}{t} = \frac{P'_B(t)}{1 - P_B(t)} = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)}, \quad t > 0, \quad (7)$$

и после преобразования

$$m(t) = - \frac{d}{dt} \ln[1 - P_B(t)],$$

с учетом того, что  $P_B(0) = 0$ , получаем классическое экспоненциальное распределение [4]:

$$P_B(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t \mu(\tau) d\tau\right\} \quad (8)$$

Если известны интенсивности отказов каждого элемента системы, то среднее время восстановления при экспоненциальном законе распределения равно [5]:

$$T_B = \frac{1}{m} = \frac{\frac{N_1 l_1}{m_1} + \frac{N_2 l_2}{m_2} + \dots + \frac{N_k l_k}{m_k}}{\sum_{i=1}^k N_i l_i}, \quad (9)$$

где  $m = \frac{1}{T_{Bi_0} + T_{Bi_1}}$  – интенсивность восстановления  $i$ -го элемента;

$T_{Bi_0}$  – среднее время обнаружения места отказа;

$T_{Bi_1}$  – среднее время устранения отказа;

$N_i$  – число объектов в начале испытаний;

$T_0 \gg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{cp_i}$  – средняя наработка на отказ;

$t_{cp_i}$  – среднее время непрерывной работы между интервалами  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказами;

$n$  – число отказов;

$l$  – интенсивность отказов.

Представленные рассуждения справедливы для стационарных процессов, что выполняется после периода приработки системы на большом временном интервале эксплуатации. Понятно, что говорить о стационарности интенсивности отказов в рабочем режиме не приходится. Стационарность позволяет оперировать основными моментами, в частности, математическим ожиданием выходов из строя элементов и, соответственно, требуемыми номенклатурой и числом запасных частей для обслуживания системы, а интенсивность восстановлений – численностью и квалификацией персонала.

Современный подход к проектированию сложных систем с приоритетом по надежности предполагает обслуживание по фактическому состоянию [6]. Полагая, что контроль мест отказа в системе осуществляется по стандартной методике с использованием встроенной аппаратуры контроля, измерительного оборудования и программных продуктов, ограничим задачу рассмотрения теплонагруженными элементами системы. Считаем при этом поток отказов простейшим, а время восстановления описывается экспоненциальной зависимостью (8). Вероятность работоспособного состояния системы:

$$W(t) = -l P_1(t) + m P_2(t) \quad (10)$$

Или с учетом того, что  $P_1(t) + P_2(t) = 1$  это выражение примет вид

$$W(t) + (m+l) P_1(t) = m \quad (11)$$

Если предположить, что в момент времени перехода системы из дежурного состояния в рабочее состояние она с вероятностью  $V$  будет находиться в работоспособном состоянии, т.е.  $P_1(0) = V$ , где  $0 \leq V \leq 1$ , то

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} - V \right] \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \quad (12)$$

Если в системе заложен принцип обслуживания по фактическому состоянию и осуществляется контроль элементов, и система на момент перехода оказывается работоспособной, т.е.  $V = 1$ , выражение (12) принимает вид

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} \exp\{-(\mu + \lambda)t\} \right] \quad (13)$$

Второе крайнее состояние, когда система неработоспособна, т.е.  $\nu=0$ , выражение (12) принимает вид

$$P_1(t) = \frac{m}{l+m} [1 - \exp\{-(m+l)t\}] \quad (14)$$

Выражения (12 – 14) характеризуют вероятность работоспособного состояния системы в произвольный момент времени  $t$  и определяют функцию готовности системы. Если отношение дифференциальных плотностей обозначить  $G = l/m$ , то (14) принимает вид

$$P_1(t) = \frac{1}{1+G} \left[ 1 + G \exp\left\{-\frac{1+G}{G} \lambda t\right\} \right] \quad (15)$$

Аналогично вероятность наступления неработоспособного состояния

$$P_2(t) = \frac{G}{1+G} \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{1+G}{G} \lambda t\right\} \right] \quad (16)$$

При длительном нахождении системы в работоспособном состоянии ( $t \rightarrow \infty$ ) получаем стационарное решение или коэффициент готовности [5]:

$$P_1 = \frac{1}{1+G} = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = K_G, \quad (17)$$

показывающего вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Тогда выражение для функции готовности может быть представлено в виде

$$P_1(t) = K_G + (1 - K_G) \exp\left\{-\frac{1}{K_G T_B} t\right\}, \quad (18)$$

а при малых значениях  $t$

$$P_1(t) \approx K_G + (1 - K_G) \left( 1 - \frac{1}{K_G T_B} t \right) \approx 1 - \frac{1}{T_B} t \quad (19)$$

Приведенные зависимости позволяют сделать выводы по проектированию систем с теплонагруженными элементами. Из выражения (9) следует, что время восстановления работоспособности системы можно разбить на два этапа. Промежуток времени с момента появления отказа до момента его обнаружения и идентификации системой  $t_o$ , отработку функций которого можно передать компьютеру; и времени замены отказавшего элемента и тестирования работоспособности системы  $t_y$ , требующее действий оператора, по крайней мере, в первой фазе. В соответствии с [3, 5], основное время затрачивается на поиск отказавшего элемента, поэтому и время восстановления в основном определяется этой величиной. Выражения (17–19) также показывают, что эффективность функционирования системы напрямую связана со временем восстановления. Поскольку интенсивность отказов существенно зависит от коэффициента нагрузки, появляется насущная необходимость контроля работоспособности в первую очередь теплонагруженных элементов и сокращения времени обнаружения и идентификации  $t_o$ . Это возможно только при обеспечении критичных теплонагруженных элементов системой самоконтроля как минимум работоспособности, а желательно и определения передаточных характеристик с возможностью предсказания момента отказа.

**Список литературы:** 1. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств [Текст] / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. — М. : Солон-Пресс, 2004. — 464 с. — ISBN 5-98003-145-6. 2. Надежность технических систем

[Текст] : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; под общ. ред. И. А. Ушакова. — М. : Радио и связь, 1985.— 608 с. 3. Фролов, А. Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / А. Д. Фролов. — М. : Высшая школа, 1970. — 488 с. 4. Костерев, В. В. Надежность технических систем и управление риском [Текст] / В. В. Костерев. — М. : МИФИ, 2008. — 280 с. 5. Острейковский, В. А. Теория надежности [Текст] / В. А. Острейковский. — М. : Высшая школа, 2003. — 463 с. 6. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст] : учеб, пособие / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. — М. : Логос, 2001. — 208 с. — морф. — ISBN 5-940100-42-2.

*Поступила в редколлегию 27.06.2011*

**УДК 656.022.1(100)**

**В.В. КОЗАК**, Голова Державної адміністрації залізничного транспорту України «Укрзалізниця», Київ

**М.І. ДАНЬКО**, докт.техн.наук, проф., ректор, УкрДАЗТ, Харків

**Є.С. АЛЬОШИНСЬКИЙ**, докт.техн.наук, проф., зав. каф., УкрДАЗТ, Харків

## **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМИ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДОПОТОКІВ У МЕЖАХ МІЖНАРОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРІВ УКРАЇНИ**

Розроблено імітаційну модель, що відображає процес обробки поїздів на напрямках міжнародних вантажних перевезень при використанні різних технологічних та технічних рішень. Запропоновано нову схему перерозподілу міжнародних поїздопотоків на мережі залізниць України.

Ключові слова: міжнародні транспортні коридори, моделювання, перерозподіл поїздопотоків.

Разработана имитационная модель, отображающая процесс обработки поездов на маршрутах международных грузовых перевозок при использовании различных технологических и технических решений. Предложена новая схема перераспределения международных поездопотоков на сети железных дорог Украины.

Ключевые слова: международные транспортные коридоры, моделирование, перераспределение поездопотоков.

Developed a simulation model that shows the processing of trains on the routes of international freight traffic by using different technological and technical solutions. A new scheme of international trains redistribution in the railway network in Ukraine.

Keywords: international transport track, modeling, trains redistribution.

### **Вступ**

Однією з базових галузей економіки є залізничний транспорт, стабільне та ефективне функціонування якого являє необхідну умову для забезпечення обороноздатності, національної безпеки і цілісності держави, підвищення рівня життя населення. Але, на жаль, стан виробничо-технічної бази залізниць і технологічний рівень перевезень за багатьма параметрами не відповідає європейським стандартам якості надання транспортних послуг, що найближчим часом може стати перешкодою для подальшого соціально-економічного розвитку держави [1].